Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Análise da conectividade funcional através da caracterização do movimento de
Heliconius erato

Julia de Lima Pinheiro

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Conservação de Ecossistemas Florestais

Piracicaba
2017

Julia de Lima Pinheiro
Bacharela em Ciências Ambientais

Análise da conectividade funcional através da caracterização do movimento de *Heliconius erato*

Orientador:
Prof. Dr. **RICARDO RIBEIRO RODRIGUES**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Conservação de Ecossistemas Florestais

Piracicaba
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Pinheiro, Julia de Lima

Análise da conectividade funcional através da caracterização do movimento de *Heliconius erato* / Julia de Lima Pinheiro. - - Piracicaba, 2017.

36 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Ecologia da paisagem – Batatais (SP) 2. Florestas – Mata Atlântica 3. *Lepidoptera* I. Título

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente e principalmente, aos amores da minha vida: Marisa, Camilo e Douglas. À Marisa (mamãe) por toda dedicação, compreensão e paciência. Ao Camilo (papai) por toda preocupação e ajuda (e pelo carro!). Ao Douglas, meu noivo e futuro marido, por tudo. Tudo mesmo. Obrigada por ser tão companheiro em todos os sentidos, obrigada pelo apoio e por ter tornado os meus campos maravilhosos.

Agradeço aos meus cunhados Gustavo e Vanessa que sempre se interessaram pelo andamento do meu mestrado, comemorando minhas alegrias e sofrendo meus problemas.

Agradeço ao Maurício por ter me ajudado muito em vários campos. Obrigada pelas caronas, ideias e risadas.

Agradeço ao meu orientador Ricardo Ribeiro Rodrigues e ao meu co-orientador Danilo Boscolo. Obrigada pelo apoio e auxílio.

Agradeço à Juliana Takata e suas colegas de apartamento. Agradeço imensamente por terem me abrigado durante vários dias.

Agradeço à Suzete por estar sempre disponível para me ajudar.

Agradeço a Usina Batatais por permitir que eu realizasse meu estudo em suas dependências e por todo o auxílio prestado. Agradeço especialmente ao Marcos Trigo, sempre disponível para me auxiliar. Também agradeço especialmente ao Edson com seu trator que me salvou durante uma chuva incessante.

Agradeço ao Cnpq e à Fapesp pelo apoio financeiro (processos 131611/2015-1 e 2015/08211-6, respectivamente).

*"Eu queria insistir
Mas o caminho só existe
Quando você passa"
(Chico Amaral / Samuel Rosa)*

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	13
2.1. ÁREA DE ESTUDO.....	13
2.2. CARACTERIZAÇÃO DA PAISAGEM.....	14
2.3. ESPÉCIE ESTUDADA.....	14
2.4. AVALIAÇÃO DO PADRÃO DE MOVIMENTAÇÃO.....	15
2.5. ANÁLISE DOS DADOS	16
3. RESULTADOS	19
4. DISCUSSÃO	29
5. CONCLUSÕES	31
REFERÊNCIAS	33

RESUMO

Análise da conectividade funcional através da caracterização do movimento de *Heliconius erato*

A influência antrópica em habitats naturais pode causar perda e fragmentação florestal. Esse processo altera a quantidade de espécies, comprometendo a conservação biológica. Os efeitos da fragmentação dependem, dentre outras características, da conectividade entre os remanescentes. A conectividade funcional depende de como um organismo percebe e responde à estrutura da paisagem. Entender os fatores que determinam a qualidade da matriz para os organismos e entender o movimento animal são etapas essenciais para guiar iniciativas de conservação em paisagens fragmentadas. Como as borboletas são indicadas para o monitoramento ambiental, a partir da caracterização do movimento de indivíduos da espécie de borboletas *Heliconius erato*, foi possível inferir a respeito da sua capacidade de percepção e analisar a conectividade funcional da paisagem estudada. O estudo foi realizado na porção norte do município de Batatais, no interior do estado de São Paulo. Foi realizada a translocação de 78 indivíduos para a matriz a diferentes distâncias em relação a floresta e observado o seu caminho de retorno para a floresta. A taxa de retorno dos indivíduos translocados ao fragmento em função da distância foi avaliada pela análise de sobrevivência de Cox em conjunto com a razão entre os indivíduos que retornaram pela quantidade total por distância. A tortuosidade dos trajetos foi avaliada através da análise de Passos Aleatórios Correlacionados em conjunto com a razão entre a distância efetiva e a soma dos comprimentos para cada trajetória. Foi realizada uma análise de variância para avaliar se há diferenças de tortuosidade entre as distâncias. Para relacionar esse índice com a distância à floresta foram utilizados modelos lineares generalizados. Esses modelos foram comparados através do AICc. A orientação dos ângulos foi analisada através de estatística circular com teste de Rayleigh, teste-V e histogramas. Conforme aumenta a distância, diminui a quantidade de indivíduos que retornam à floresta. A taxa de retorno cai pela metade na distância de 150m. A partir da análise de Cox notou-se que a distância influencia a taxa de retorno dos indivíduos em conjunto com a tortuosidade e o local de soltura. A hora do dia e o local de soltura explicaram a variação na tortuosidade. A análise dos ângulos demonstrou que a partir de 150m os voos se tornam aleatórios. Dessa forma, para garantir a conservação do gênero *Heliconius* em paisagens agrícolas que incluem cultivos estruturalmente distintos dos fragmentos florestais é necessário manter uma distância de no máximo 100 metros entre os fragmentos.

Palavras-chave: Ecologia da paisagem – Batatais (SP); Florestas – Mata Atlântica; *Lepidoptera*

ABSTRACT

Analysis of the functional connectivity through the characterization of movement of the species *Heliconius erato*.

The anthropic influence on natural habitats may cause forest loss and fragmentation. This process changes species richness, compromising their conservation. The effects of forest fragmentation depend, among other factors, on the functional connectivity, namely on how an organism perceives and responds to the landscape structure. Understanding the factors that determine the quality of the matrix for the organisms and understanding animal movement are essential steps to guide conservation initiatives on fragmented landscapes. Therefore, from the movement characterization of the butterfly species *Heliconius erato*, which is indicated as a good surrogate for environmental monitoring, it was possible to infer about its perception capacity and to analyze landscape functional connectivity for this species. The study was conducted in the Northern region of Batatais, São Paulo. The translocation of 78 *Heliconius erato* individuals was conducted to non-forested matrix at different distances from forest patches and their paths back to the forest were actively recorded. The rate of return of the translocated individuals to their original forest patch as a function of the distance was evaluated with Cox survival analysis together with the ratio between the individuals which returned and the total amount per distance. Path tortuosity was measured through the Correlated Random Walk analysis together with the ratio between the effective distance and the sum of lengths for each path. An ANOVA was conducted to check for tortuosity differences between distances. To relate this index with the distance to the forest, generalized linear models were used. These models were compared through AICc. The angles orientation was analyzed through circular statistics with Rayleigh test, V-test and histograms. As distance increased the number of individuals returning to the forest decreased. The return rate dropped to 50% at 150m. Through Cox analysis it was noted that the distance together with tortuosity and release site influenced the return rate. The time of the day and the release site explained the tortuosity range. Angle analysis showed that as further than 150m the flights become random. Therefore, to ensure the conservation of the *Heliconius* genus in agricultural landscapes that include structurally distinct crops from forest fragments it is important to maintain a 100m mean inter-patch distance.

Keywords: Landscape ecology – Batatais (SP); Forests – Atlantic Forest; *Lepidoptera*

1. INTRODUÇÃO

A expansão das atividades humanas sobre áreas naturais tem causado, inevitavelmente, o estabelecimento de mosaicos de ambientes com diferentes graus de adequação para a ocorrência e dispersão de indivíduos de espécies nativas e não-nativas (UMETSU; METZGER; PARDINI, 2008). Dentre os diferentes ambientes existentes nesses mosaicos, estão as matrizes. Dependendo da sua natureza, elas podem permitir ou impedir a dispersão de indivíduos (HAYNES; CRONIN, 2006), o que vem a determinar os efeitos do isolamento das manchas de habitat (BENDER; FAHRIG, 2005). Dentre os diversos conceitos existentes, as matrizes podem ser definidas como unidades da paisagem que sofreram perturbação antrópica intensa, sendo ambientes de baixa qualidade para uma determinada comunidade ou espécie (ANTONGIOVANNI; METZGER, 2005). Sendo essa a definição utilizada durante o desenvolvimento deste trabalho.

Esses mosaicos são criados devido à fragmentação florestal que, comumente, vem acompanhada de grande perda de habitat (WILCOX; MURPHY, 1985) e quando isso ocorre seus efeitos podem ser determinados, principalmente, pelo tamanho dos fragmentos, o isolamento e a conectividade entre eles (HANSKI, 2015). O tamanho dos fragmentos é a área remanescente de habitat em cada mancha, o isolamento refere-se à distância entre essas manchas e a conectividade pode ser definida como o grau que a paisagem influencia o movimento dos indivíduos entre fragmentos, facilitando ou dificultando-o (TAYLOR et al., 1993).

A conectividade entre fragmentos pode ser compreendida sob duas perspectivas complementares: a estrutural e a funcional. A conectividade estrutural refere-se ao grau com que determinados elementos de interesse da paisagem são contínuos ou fisicamente ligados uns aos outros (WITH; GARDNER; TURNER, 1997; TISCHENDORF; FAHRIG, 2000). Esse tipo de conectividade desconsidera processos comportamentais que influenciam o movimento animal (CROOKS; SANJAYAN, 2006). Em contraste, a conectividade funcional depende de como um organismo percebe e responde à estrutura da paisagem. As respostas comportamentais são interpretadas de modo a sugerir se os fragmentos na paisagem estão conectados pela perspectiva do organismo (PE'ER et al., 2011). Dessa forma, ela é avaliada de acordo com as características da espécie ou do processo envolvido e sua relação com a organização espacial dos ambientes ao seu redor (BÉLISLE, 2005). Devido a isso, a conectividade funcional é reconhecida como um dos maiores determinantes da distribuição animal em paisagens heterogêneas (CROOKS; SANJAYAN, 2006). Entretanto, a maioria dos estudos sobre movimento de animais em paisagens fragmentadas tem focado apenas na conectividade estrutural (DANCOSE; FORTIN; GUO, 2011). Apenas gradualmente as pesquisas vêm demonstrando que incluir a capacidade de movimentação dos animais nas matrizes pode ser essencial para compreendermos como os fluxos entre fragmentos são mantidos de forma a permitir que as populações persistam. (HUDGENS; HADDAD, 2003; DANCOSE; FORTIN; GUO, 2011; AWADE; BOSCOLO; METZGER, 2012).

A habilidade das espécies de se moverem entre fragmentos, possibilitando a conexão entre populações, é um dos fatores mais importantes a dirigir a dinâmica das populações em paisagens heterogêneas e com pouco habitat original (ZOLLNER; LIMA, 1999), pois influencia grandemente as taxas de extinção de espécies através da restrição de recursos e isolamento populacional. Também modifica o fluxo de genes, prevenindo ou colocando as populações locais em risco de perda de variabilidade genética (HANSKI, 2011). Assim, se os animais evitam as matrizes, suas populações devem tornar-se cada vez mais isoladas em paisagens fragmentadas, causando a diminuição ou colapso dessas populações. Já aquelas espécies que possuem a capacidade de explorar ou se dispersar entre os fragmentos podem permanecer estáveis ou até aumentarem sua densidade (GASCON et al., 1999). Além disso, a distância de

dispersão natal é muito importante, porque se os dispersores não forem capazes de se mover longe o suficiente entre fragmentos, eles não serão capazes de recolonizar extinções locais (FAHRIG; MERRIAM, 1994).

No entanto, essa relação é espécie-específica (SILVA, 2012) e de difícil extrapolação, uma vez que certas espécies não conseguem se movimentar com sucesso pela matriz antrópica (UEZU; BEYER; METZGER, 2008), enquanto outras encaram as matrizes como facilmente permeáveis (AWADE; METZGER, 2008). Essa especificidade de relação com a matriz envolve diretamente a capacidade de avaliação dos riscos e benefícios existentes ao se movimentar em diferentes tipos de ambientes (LARSEN; BOUTIN, 1994). As variações de qualidade da paisagem devem ser diretamente percebidas pelos animais, os quais se comportam de modo a otimizar a relação entre custos e benefícios (SILVA, 2012). Dessa forma, para a mesma espécie espera-se que sejam observados padrões de movimento diferentes de acordo com as características ambientais de cada local (ZOLLNER; LIMA, 2005; BOSCOLO et al., 2008).

Mas, apesar de fundamental para a sobrevivência de espécies em paisagens fragmentadas (FAHRIG, 2003), o movimento animal é um processo populacional ainda pouco compreendido. Isso ocorre, principalmente, porque é um fenômeno excepcionalmente complexo que engloba as interações entre história de vida, fisiologia, comportamento e habitat (PATTERSON et al., 2008). O aumento do interesse científico em analisar o movimento animal em paisagens fragmentadas levou à criação e à melhoria de diversos métodos quantitativos de análise, tais como funções de seleção passo a passo (*step-selection functions*), análise mecanística de área de vida (*mechanistic home range analysis*), caminhos aleatórios enviesados (*biased random walks*) e análise de custos mínimos (*least-cost paths*) (DANCOSÉ; FORTIN; GUO, 2011). A característica mais comum usada para descrever e analisar a movimentação com esses métodos é a tortuosidade, ou o quão convoluto é um caminho (CODLING; PLANK; BENHAMOU, 2008). Apesar das dificuldades em prever e modelar o movimento dos indivíduos é fácil quantificá-lo através de dados em termos de métricas de movimentos como, por exemplo, ângulos de giro e distância entre locais consecutivos (PATTERSON et al., 2008). Entretanto, poucos desses métodos tratam especificamente de como o movimento pode ser integrado de forma a quantificar a conectividade funcional, porque para tal é necessário obter informações a respeito dos fatores que influenciam a seleção de fragmentos, trilha de fragmentos utilizados, e trajetórias do movimento até o fragmento alvo (DANCOSÉ; FORTIN; GUO, 2011).

Levando isso em consideração, se entendermos detalhes dos padrões de movimentação entre fragmentos de habitat, podemos caracterizar a conectividade funcional para espécies focais em diferentes situações (DANCOSÉ; FORTIN; GUO, 2011). Porém, como o padrão de movimentação é difícil de identificar sob condições passivas de campo, manipulações experimentais juntamente com métodos de rastreamento podem oferecer a melhor opção para obter medidas precisas de conectividade funcional (BÉLISLE, 2005). A translocação de indivíduos, por exemplo, permite padronizar a motivação de movimento entre os indivíduos (BÉLISLE, 2005), permitindo, em conjunto com métodos quantitativos de análise como os citados anteriormente, quantificar a conectividade funcional.

Ao translocar indivíduos de certa espécie para a matriz a diferentes distâncias em relação a um fragmento florestal e observar como é seu caminho de retorno, é possível inferir a respeito da capacidade de percepção ambiental da espécie (ZOLLNER; LIMA, 1997). A capacidade de percepção é a distância máxima na qual determinado elemento da paisagem pode ser detectado por um animal (LIMA; ZOLLNER, 1996) e é um dos principais determinantes do sucesso de dispersão em paisagens fragmentadas (ZOLLNER; LIMA, 2005), porque determina o tempo que o animal gasta na matriz procurando por habitat e os riscos de predação relacionados (LIMA; ZOLLNER, 1996; ZOLLNER; LIMA, 2005). Ela oferece inferências importantes sobre a conectividade funcional de uma paisagem para certa espécie, porque afeta o comportamento do indivíduo ao se mover, a

ocorrência de espécies em fragmentos isolados e a taxa de movimento entre fragmentos (PREVEDELLO; FORERO-MEDINA; VIEIRA, 2011).

Espécies com alta capacidade de percepção do ambiente em que vivem estarão propensas a percorrer um caminho de forma mais linear e ágil de volta a seu habitat natural (FORERO-MEDINA; VIEIRA, 2009). Por outro lado, espécies que possuem essa capacidade reduzida, provavelmente terão mais dificuldade de retornar à floresta, e isso se reflete no tempo e na tortuosidade do seu caminho. Além disso, se os indivíduos são soltos a diferentes distâncias na matriz é esperado que indivíduos mais próximos do seu habitat retornem mais linear e agilmente, enquanto os indivíduos que estiverem mais distantes, terão mais dificuldade de encontrar o caminho de retorno. Esse método é de grande valor quando aplicado a espécies sensíveis à fragmentação, como os invertebrados e mais especificamente as borboletas (*Lepidoptera*), comumente indicadas para o monitoramento ambiental (UEHARA-PRADO, 2003), já que possuem a taxonomia bem conhecida e ocorrem em todas as estações do ano (BROWN, 1991; BROWN, 1997). Algumas espécies de borboletas conseguem persistir em redes de pequenos fragmentos de habitat conectados pelos movimentos dos indivíduos na matriz (PETTIT et al., 2001). Além disso, são particularmente sensíveis a mudanças na paisagem e são excelentes organismos para estudar a conectividade desta (BERGEROT et al., 2013).

Dois principais determinantes da conectividade em populações de borboletas são a distância e a matriz. A conectividade diminui com o aumento da distância entre fragmentos. Entretanto, a conectividade aumenta com a maior qualidade da matriz. Isso ocorre já que uma matriz de maior qualidade oferece maior permeabilidade ao movimento dos indivíduos (POWNEY; BROADERS; OLIVER, 2012). Diversos estudos já analisaram o movimento de borboletas com diferentes objetivos (HANSKI; SAASTAMOINEN; OVASKAINEN, 2006; POWNEY; BROADERS; OLIVER, 2012; BERGEROT et al., 2013; SEVERNS; MCINTIRE; SCHULTZ, 2013; NOWICKI et al., 2014; FABRITIUS; RÖNKÄ; OVASKAINEN, 2015). Öckinger e Dyck (2012) realizaram experimentos translocando indivíduos para o campo a diferentes distâncias em relação à floresta e observando o caminho de retorno. Entretanto, o objetivo foi comparar a habilidade de encontrar o habitat entre borboletas da mesma espécie originárias de populações em paisagens com floresta contínua, com borboletas de populações originárias de paisagens agrícolas fragmentadas. Portanto, ainda não existem estudos utilizando o movimento de borboletas para analisar a conectividade funcional. Além disso, entender os fatores que determinam a qualidade da matriz para os organismos (PREVEDELLO; VIEIRA, 2010) e entender o movimento animal (ZELLER; MCGARIGAL; WHITELEY, 2012) são etapas essenciais para guiar iniciativas efetivas de conservação em paisagens fragmentadas. Como a Mata Atlântica encontra-se em uma situação alarmante de perda de habitat e fragmentação, ações de conservação e recuperação devem ser tomadas, principalmente aquelas que promovam a conectividade entre os fragmentos, já que é um dos fatores que permite avaliar o status do processo de fragmentação da paisagem (TISCHENDORF; FAHRIG, 2000).

O meu objetivo nesse trabalho foi a análise da conectividade funcional em uma paisagem fragmentada de Mata Atlântica através de pesquisas a respeito da capacidade de percepção de uma espécie de borboleta florestal quando forçada a movimentar-se pela matriz não florestal a diferentes distâncias da floresta. Os objetivos específicos foram:

- avaliar a capacidade de percepção dos indivíduos da espécie *Heliconius erato* através da distância máxima em que os indivíduos conseguem retornar à floresta;
- analisar a conectividade funcional da espécie na paisagem fragmentada em estudo;

- propor diretrizes de manutenção e restauração da Mata Atlântica para a conservação do gênero *Heliconius*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A Mata Atlântica possui uma diversidade muito grande de fauna de borboletas, apresentando cerca de 2/3 das espécies brasileiras, sendo que muitas destas são raras e difíceis de encontrar (BROWN, 1996). A Mata Atlântica é considerada um dos “hotspots” do planeta, ou seja, áreas que possuem concentrações excepcionais de espécies endêmicas e que passam ou passaram por uma grande perda de habitat, configurando locais essenciais para que haja a conservação da biodiversidade do planeta (MYERS et al., 2000). Dados do mesmo autor revelam que 2,7% das plantas e 2,1% dos vertebrados do planeta são endêmicos à Mata Atlântica. Essa região em particular encontra-se muito fragmentada, sendo que restam apenas cerca de 12 % da sua extensão original, os quais estão espalhados em fragmentos pequenos (< 50 ha) e razoavelmente isolados ente si (RIBEIRO et al., 2009).

O estudo foi desenvolvido na região norte do município de Batatais (figura 1), interior do estado de São Paulo e está situada na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí. O tipo predominante de solo na bacia é o Latossolo com variações conforme a região (OLIVEIRA et al., 2000). O clima predominante na área é do tipo Cwa, tropical de altitude com chuvas no verão e seca no inverno (KÖPPEN, 1948). Os biomas originais dessa área eram Mata Atlântica e Cerrado. Entretanto, atualmente a vegetação natural encontra-se reduzida a pequenos fragmentos de vegetação secundária em diferentes estágios de regeneração, sendo que a matriz predominante é de cana-de-açúcar.

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

Essa região foi selecionada por possuir programas de restauração florestal por parte da Usina de Batatais (UB), sendo que esta participou do Programa de Adequação Ambiental (PAA) do Laboratório de Ecologia e Restauração Florestal (LERF-ESALQ-USP) (<http://www.lerf.esalq.usp.br/>) em 2004. Dessa forma, a área oferece diversos fragmentos tanto naturais como restaurados o que permite a captura de borboletas e também os resultados do estudo poderão auxiliar a definir se esses remanescentes estão conectados funcionalmente. Além disso, a região possui uma matriz homogênea e controlada o que é essencial para o estudo, pois permite que a soltura de todos os indivíduos seja sob as mesmas condições, eliminando variações desnecessárias.

2.2. Caracterização da paisagem

Os indivíduos foram capturados em fragmentos florestais e translocados para uma matriz de cana-de-açúcar recém-colhida. A colheita é realizada de forma mecanizada e, então, são aplicados herbicidas e inseticidas. Entretanto, os inseticidas são espécie-específicos e não afetam indivíduos adultos de *Lepidoptera*. Cada área é colhida, em média, a cada 12 meses ou mais. Assim, não é possível translocar todas as borboletas para a mesma área, porque a cana depois de colhida demora menos de um mês para se tornar grande o bastante (aproximadamente 30 centímetros) a ponto de inviabilizar a soltura dos indivíduos.

Portanto, seis áreas de cana recém-colhidas foram utilizadas. Mesmo assim, todas as áreas possuíram os mesmo pré-requisitos verificados em campo antes da soltura dos indivíduos: (i) mais que 250 metros de raio de cana-de-açúcar recém-colhida - já que a distância máxima de soltura possui esse comprimento - de modo que os pontos fiquem sempre mais próximos à mata focal do que a qualquer outra mata; (ii) a mata focal buscada foi pelo menos de estádio médio e (iii) foram evitados os “Us” de mata, porque os pontos iniciais ficariam circundados de mata por três lados, ao invés de se distanciarem progressivamente desta.

2.3. Espécie estudada

A espécie estudada foi *Heliconius erato* (Lepidoptera, Nymphalidae) (Figura 2). É considerada a espécie mais variável do gênero, sendo reconhecidas 29 subespécies (HOLZINGER; HOLZINGER, 1994). A subespécie com a qual foi feito o estudo é a *Heliconius erato phyllis*. É comumente encontrada em ambientes ensolarados, sendo comum em florestas abertas ou perturbadas, bem como clareiras em florestas densas (BROWN, 1992). Essa espécie é típica de ambientes florestais e está normalmente presente em florestas secundárias, onde os adultos utilizam as espécies do gênero *Passiflora* (maracujás) para ovoposição e apresentam hábitos como territorialidade e a formação de sítios de repouso (PÉRICO, 1995).

Figura 2. Foto de indivíduo de *Heliconius erato*.

Heliconius erato é caracterizada pelo voo tipicamente lento e com direção constante (ENDRINGER; SILVA; LUTZ, 2004), com sentido de orientação bem desenvolvido. De acordo com o mesmo autor, estas características do voo podem ser interpretadas como parte de estratégias contra predação, pois permitem que os predadores identifiquem e interpretem mais rapidamente a coloração de advertência presente nas asas. Dessa forma, a borboleta *Heliconius erato* foi escolhida para o presente estudo, pois é uma espécie de fácil manipulação e com o voo que permite o rastreamento dos indivíduos, já que é caracterizado por ser lento. Além disso, é uma espécie que possui relação com florestas secundárias (PÉRICO, 1995), o que permite inferir, através da sua translocação e rastreamento, a respeito da conectividade funcional.

2.4. Avaliação do padrão de movimentação

Para avaliar como varia o padrão de movimentação na matriz e a capacidade de retorno das borboletas aos fragmentos florestais, de modo a analisar a conectividade funcional, alguns indivíduos de *H. erato* foram capturados, translocados e soltos em uma matriz não florestal. Essa espécie é tipicamente florestal, adaptada a habitats com grande cobertura vegetal. A matriz possuía composição vegetacional e características estruturais completamente distintas dos fragmentos florestais, já que a matriz de soltura eram áreas de cultivo de cana-de-açúcar recém-colhida. Levando isso em consideração, esta matriz pode ser considerada como de baixa qualidade.

A captura dos indivíduos foi feita utilizando redes entomológicas (puçá) constituídas por um cabo de madeira, ao qual vai preso um aro de metal e um saco de filó com o fundo arredondado. O puçá pode ser usado para capturar as borboletas em pleno voo, ou quando estiverem repousando. Os indivíduos foram acomodados em caixas de isopor revestidas de papel alumínio, evitando a entrada de luz e consequente aprendizado pelos indivíduos de sua posição, e translocados para a matriz aberta a diferentes distâncias a um fragmento florestal para avaliarmos sua capacidade de retornar a seus habitats. Os fragmentos florestais nos quais os indivíduos eram capturados não eram os mesmos fragmentos focais usados durante a soltura, para evitar comportamento de retorno à mata natal. Tal comportamento poderia confundir os resultados, já que aqui era desejado saber a capacidade de percepção dos indivíduos em relação a qualquer fragmento florestal.

A soltura dos indivíduos foi realizada a partir da borda do fragmento e sequencialmente a cada 25 metros, até uma distância de 100 metros e, então, a cada 50 metros, até uma distância de 250 metros (figura 3). Sendo assim, foram sete distâncias de soltura. Era esperado que a cada distância fossem soltos e observados 10 indivíduos de cada grupo, totalizando 70 translocações. Entretanto, foi possível fazer algumas translocações adicionais em algumas distâncias. O movimento das borboletas na matriz foi então rastreado visualmente. Esses indivíduos foram seguidos por um único observador, que se manteve a pelo menos 1 metro de distância das borboletas, posicionando-se de forma que a sua sombra não alcançasse os indivíduos observados, reduzindo o risco de maiores perturbações comportamentais. O observador também mudava sua direção relativa aos indivíduos translocados durante a observação para garantir que não houvesse acomodação comportamental. Durante as observações, as trilhas de movimento foram marcadas através de sacos numerados preenchidos com pedras— ou pesos numerados - que foram colocados em cada ponto de mudança de direção ou local de pouso (PE'ER et al., 2004). Os trajetos foram registrados por 20 minutos ou até que os indivíduos observados alcançassem algum fragmento florestal. Foi considerado que os indivíduos que não alcançaram o fragmento dentro desse período de tempo não conseguiram retornar em nenhum momento. O não-retorno implica para a análise como não-sobrevivente, já que quanto mais tempo o indivíduo passa na matriz, maior é a probabilidade de predação ou óbito por restrição energética.

Figura 3. Ilustração do desenho experimental.

Após cada translocação realizada, a distância e o ângulo entre um peso numerado e outro foram marcadas, respectivamente, com trena e com transferidor, considerando-se como 0° a direção ao fragmento florestal mais próximo. As mudanças de direção foram inferidas através dos ângulos medidos entre os pontos marcados. Com isso foi possível calcular a razão entre a distância efetiva e a soma dos comprimentos, que indica se o movimento do indivíduo foi mais retilíneo ou tortuoso. A distância efetiva é a distância em linha reta entre o ponto de soltura (ponto inicial) e o último ponto marcado para a rota. Quanto mais próximo de 1 for essa razão, mais retilíneo foi o trajeto.

2.5. Análise dos dados

A taxa de retorno dos indivíduos foi analisada através da razão entre o número de indivíduos que retornaram e o número total de indivíduos translocados por distância. Adicionalmente, a taxa de retorno dos indivíduos translocados ao seu fragmento de origem em função da distância foi avaliada pela análise de sobrevivência de Cox (COX, 1972), sendo os indivíduos que não chegaram à floresta no tempo máximo de observação (20

minutos) considerados como não-sobreviventes. Os indivíduos perdidos de vista foram considerados como “right censored”. Foram avaliadas cinco variáveis explicativas (Distância, Razão, Hora, Local e Beaufort), as quais foram combinadas de diferentes maneiras, gerando modelos. Estes foram comparados através do Critério de Informação de Akaike corrigido para amostras pequenas (AICc – HURVICH; TSAI, 1989). Os modelos com $p > 0.05$ foram desconsiderados antes da comparação. A variável “Distância” corresponde às diferentes distâncias de soltura em relação à floresta (25m, 50m, 75m, 100m, 150m, 200m e 250m). A variável “Razão” corresponde à razão entre a distância efetiva e a soma dos comprimentos, que pode variar de zero a um. A variável “Hora” corresponde à hora do dia em que foi realizada a soltura que variou de 7.5 – 13.75 (7h30 as 13h45). A variável “Local” é relativa aos seis diferentes locais utilizados para soltura de indivíduos. E a variável “Beaufort” corresponde à escala de velocidade do vento de Beaufort, que nesse estudo variou de 1 a 4.

Para analisar a tortuosidade foi realizada a análise de Passos Aleatórios Correlacionados (Correlated Random Walk – KAREIVA; SHIGESADA, 1983). Essa análise indica se o indivíduo se locomoveu de forma mais retilínea ou tortuosa, levando em conta os ângulos de giro entre os pontos marcados com os pesos numerados. A variação do índice de tortuosidade do caminho foi avaliada em função da distância entre o ponto de soltura e o fragmento florestal mais próximo, medida com trena métrica. Assim, avaliamos se houve variação comportamental com a distância a áreas florestais e de que forma isso varia. Para isso, após cada trajetória foram medidos os comprimentos e os ângulos de giro entre pontos consecutivos. A partir disso foi possível obter o deslocamento retilíneo (R_n) das trajetórias, que trata-se da distância entre o ponto inicial e os outros pontos consecutivamente.

Para relacionar essa análise com a distância à floresta foram utilizados modelos lineares generalizados (GLM). Foi utilizada a família Gaussiana que era a que melhor representava os dados dos modelos. Esses modelos foram gerados através de diferentes combinações de cinco variáveis explicativas (Distância, Razão, Hora, Local e Beaufort). Esses modelos foram comparados através do AICc. Assim, pudemos avaliar se houve variação comportamental com a distância a áreas florestais e de que forma isso varia.

Adicionalmente, a tortuosidade dos trajetos executados por cada indivíduo foi avaliada através da razão entre a distância efetiva e a soma dos comprimentos, que indica se o movimento do indivíduo foi mais retilíneo ou tortuoso. A distância efetiva é a distância em linha reta entre o ponto de soltura (ponto inicial) e o último ponto marcado para a rota. Quanto mais próximo de 1 for essa razão, mais retilíneo foi o trajeto. Foi realizada análise de variância (ANOVA) por distância, para avaliar se os grupos diferiam entre si, seguida de teste Tukey para observar entre quais grupos existia diferença.

Para observar a diferença de orientação dos indivíduos dependendo das distâncias foram desenvolvidos histogramas e ângulos médios para cada distância utilizando os ângulos observados entre pesos numerados consecutivos, considerando a direção à floresta como 0° . Também foi realizado o teste de Rayleigh, a partir do qual é possível obter o nível de concentração dos ângulos, ou “ r ”, que indica se os ângulos ficaram mais concentrados para uma determinada direção. Quanto maior o valor de “ r ”, mais concentrados os ângulos estão. Além disso, foi realizado o teste V no qual se estabeleceu a média esperada como sendo 0° (direção para a floresta). Com esse teste é obtido o valor de “ V ”: quanto mais próximo de 1 é esse valor, mais próximo da direção estabelecida estava a maioria dos ângulos.

3. RESULTADOS

Foram capturadas 78 borboletas sendo que dessas, 10 borboletas foram translocadas para 25m; 13 para 50m; 12 para 75m e 100m; 10 para 150m e 200m; e 11 para 250m. Os indivíduos foram considerados não sobreviventes quando não alcançavam o fragmento florestal em 20 minutos. De maneira geral, é possível observar uma tendência de diminuição da quantidade de indivíduos que alcança a floresta conforme aumenta a distância em relação à floresta (Tabela 1). Observações realizadas em campo explicam um número grande de indivíduos perdidos de vista na distância de 250m: cerca de metade dos indivíduos soltos a essa distância levantaram voo muito alto o que dificulta ainda mais manter o contato visual. Esse comportamento também foi observado em outras distâncias – 75m, 150m e 200m –, mas com menos frequência, o que indica que a 250m as borboletas não percebem a floresta tão bem e arriscam um voo mais alto provavelmente para obter dicas visuais.

Para o grupo de 25m, a taxa de retorno para a floresta foi 1.0, já que todos os indivíduos translocados retornaram. Entretanto, para o grupo de 250m a taxa foi zero, porque nenhum indivíduo retornou. Para os tratamentos 50m, 75m e 100m os valores foram semelhantes, em torno de 0.6. Para 150m, ainda 50% dos indivíduos conseguiram retornar. Entretanto, para o grupo de 200m a taxa é reduzida à aproximadamente metade em relação ao tratamento anterior (150m) (Tabela 1).

Tabela 1. Quantidade de indivíduos que alcançaram a floresta, que foram perdidos de vista e não retornados para cada distância; total de translocações e taxa de retorno por distância (razão entre o número de indivíduos que retornaram e o número total de indivíduos translocados por distância).

	25m	50m	75m	100m	150m	200m	250m
Alcançaram a floresta	10	9	7	7	5	3	0
Perdidos de vista	0	2	5	5	5	4	10
Não sobreviventes	0	2	0	0	0	3	1
Total	10	13	12	12	10	10	11
Taxa de retorno	1	0,69	0,60	0,60	0,50	0,30	0

Para avaliar o que influencia no tempo de retorno e sobrevivência dos indivíduos foi realizada a análise de Cox. O modelo com menor valor de AICc foi o que possuía a Distância, Razão, Local e Beaufort como variáveis explicativas (C1). Mas ele possuía um valor semelhante ao modelo cujas variáveis explicativas eram apenas Distância, Razão e Local (C2, Tabela 2). Portanto, eu preferi o mais simples (C2) como melhor modelo, por parcimônia.

Portanto, a análise de Cox corrobora os dados de taxa de retorno, já que a taxa diminui com a distância. A tortuosidade (Razão) também foi uma boa variável explicativa, já que caminhos mais tortuosos aumentam o tempo do trajeto e reduzem a taxa de retorno, porque os indivíduos gastam mais energia do que em um caminho retilíneo para a floresta. Além disso, devido à necessidade, as borboletas não puderam ser todas soltas no mesmo local. Foram utilizados seis diferentes locais de soltura. Todos os locais possuíam os pré-requisitos necessários para a soltura, mas possuíam características distintas. As principais variações entre os locais eram com relação à topografia e altura da vegetação. Alguns locais possuíam pequenos morros – os quais são feitos propositalmente devido à plantação de cana-de-açúcar. Em alguns casos da floresta para os pontos de soltura era uma subida, enquanto em outros era uma descida. Além do mais, após alguns dias translocando para a mesma área a rebrota da cana-de-açúcar crescia. Dessa

forma, em alguns dias não havia nenhuma vegetação, enquanto em outros ela chegava a 20 centímetros. Em outras palavras, cada local apresentava dificuldades particulares que podem ter influenciado a taxa de retorno em conjunto com a distância em relação à floresta e a tortuosidade do caminho.

Tabela 2. Comparação através de AICc dos diferentes modelos gerados. Distância: 25m, 50m, 75m, 100m, 150m, 200m, 250m; Razão: 0-1, quanto mais próximo de 1, mais retilíneo foi o trajeto; Beaufort: 1-4, escala de velocidade do vento; Local: 1-6, diferentes locais de soltura; Hora: 7.5 – 13.75, hora do dia em que a soltura foi realizada.

Modelo	Variáveis explicativas	AICc	$\Delta AICc$	W
C1	Distância + Razão + Local + Beaufort	243.617	0	0.30907
C2	Distância + Razão + Local	244.075	0.458	0.24171
C3	Distância + Razão + Local + Hora	245.258	1.641	0.13378
C4	Distância + Razão + Local + Beaufort + Hora	245.504	1.887	0.11830
C5	Distância + Razão	246.390	2.773	0.07596
C6	Distância + Razão + Beaufort	246.411	2.794	0.07517
C7	Distância + Razão + Hora	248.520	4.903	0.02618
C8	Distância + Razão + Beaufort + Hora	248.618	5.001	0.02493
C9	Razão	264.430	20.813	0.00000
C10	Razão + Beaufort	264.681	21.064	0.00000
C11	Razão + Local	265.300	21.683	0.00000
C12	Razão + Local + Beaufort	265.307	21.690	0.00000
C13	Distância + Local	265.671	22.054	0.00000
C14	Razão + Beaufort + Hora	265.819	22.202	0.00000
C15	Razão + Hora	265.962	22.345	0.00000
C16	Razão + Local + Beaufort + Hora	266.930	23.313	0.00000
C17	Razão + Local + Hora	267.005	23.388	0.00000
C18	Distância + Local + Beaufort	267.630	24.013	0.00000
C19	Distância + Local + Hora	267.783	24.166	0.00000
C20	Distância	268.948	25.331	0.00000
C21	Distância + Local + Beaufort + Hora	269.837	26.220	0.00000
C22	Distância + Beaufort	270.800	27.183	0.00000
C23	Distância + Hora	270.844	27.227	0.00000
C24	Distância + Beaufort + Hora	272.667	29.050	0.00000

Para avaliar a tortuosidade foram obtidos valores de deslocamento retilíneo (R_n) para cada grupo de distância. Espera-se que a distância do R_n após n passos aumente à medida que a borboleta segue sua trajetória de retorno à floresta. De maneira geral esse padrão se mantém, exceto para 50m e 250m, nos quais o valor máximo não coincide com o último ponto observado. Isso significa que os indivíduos tinham tendência a retornar durante o caminho, não apenas avançar. O tratamento de 50m (Figura 5) difere pronunciadamente dos outros tratamentos (Figuras 4, 6, 7, 8, 9 e 10), com retornos constantes, indicando uma tortuosidade maior. A análise de variância da tortuosidade para os diferentes tratamentos apresentou uma diferença significativa (Tabela 3), mas os resultados do

teste Tukey não apresentaram um padrão (tabela 4). Isso ocorreu provavelmente porque a distância em relação à floresta não foi o principal fator influenciando a tortuosidade. Entretanto, é possível observar um padrão a partir de 150m sendo que a variação aumenta à medida que aumentam o número de passos, o que indica que os indivíduos estavam voando em círculos. Isso explica porque a 150m a taxa de retorno cai para metade.

Figura 4. Deslocamento absoluto (retilíneo) (média $\pm$ DP) após n passos a partir do ponto de origem da trajetória para o grupo de 25m.

Figura 5. Deslocamento absoluto (retilíneo) (média $\pm$ DP) após n passos a partir do ponto de origem da trajetória para o grupo de 50m.

Figura 6. Deslocamento absoluto (retilíneo) (média $\pm$ DP) após n passos a partir do ponto de origem da trajetória para o grupo de 75m.

Figura 7. Deslocamento absoluto (retilíneo) (média $\pm$ DP) após n passos a partir do ponto de origem da trajetória para o grupo de 100m.

Figura 8. Deslocamento absoluto (retilíneo) (média $\pm$ DP) após n passos a partir do ponto de origem da trajetória para o grupo de 150m.

Figura 9. Deslocamento absoluto (retilíneo) (média $\pm$ DP) após n passos a partir do ponto de origem da trajetória para o grupo de 200m.

Figura 10. Deslocamento absoluto (retilíneo) (média $\pm$ DP) após n passos a partir do ponto de origem da trajetória para o grupo de 250m.

Para complementar a análise de tortuosidade foi realizada uma análise de variância ANOVA por distância para a razão entre a distância efetiva e a soma dos comprimentos. Foi possível observar uma diferença significativa entre os grupos (Tabela 3). Entretanto, ao realizar o teste Tukey não foi possível observar um padrão (Tabela 4). Isso ocorreu provavelmente porque a distância em relação à floresta não foi o principal fator influenciando a tortuosidade.

Tabela 3. Resultados da análise variância (ANOVA) por grupos de distância: 25m, 50m, 75m, 100m, 150m, 200m, 250m.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Entre grupos	0.768153	6	0.128026	2.84804	0.015917
Dentro dos grupos	2.921891	65	0.044952		
Total	3.690044	71			

Tabela 4. Resultados do teste Tukey (valor-p bi-caudal e graus de liberdade) por grupos de distância: 25m, 50m, 75m, 100m, 150m, 200m, 250m. Valores em negrito indicam diferença significativa ($p < 0.05$).

	50m		75m		100m		150m		200m		250m	
	p	GL	p	GL	p	GL	p	GL	p	GL	p	GL
25m	0.019	12	0.325	17	0.004	13	0.016	11	0.278	07	0.827	11
50m			0.070	15	0.722	21	0.995	19	0.309	15	0.070	19
75m					0.021	17	0.060	14	0.580	09	0.709	15
100m							0.720	20	0.171	14	0.027	20
150m									0.296	14	0.062	18
200m											0.454	13

De forma a definir o que influencia a tortuosidade dos caminhos foram utilizados modelos lineares generalizados (GLM). Conforme esperado devido aos testes anteriores, a distância não foi o principal fator. Notou-se que a hora do dia e o local em que se realizou a soltura foram as melhores variáveis explicativas para a variação na tortuosidade. A hora do dia teve influência provavelmente pela diferença de temperatura e/ou diferença de comportamento ao longo do dia. O local de soltura foi importante provavelmente pelas diferenças de local para local, conforme explicado anteriormente.

Tabela 5. Comparação através de AICc dos diferentes GLMs gerados. Razão: 0-1, quanto mais próximo de 1, mais retilíneo foi o trajeto; Distância: 25m, 50m, 75m, 100m, 150m, 200m, 250m; Beaufort: 1-4, escala de velocidade do vento; Local: 1-6, diferentes locais de soltura; Hora: 7.5 – 13.75, hora do dia em que a soltura foi realizada.

Fórmula	AICc	$\Delta AICc$	W
Razão ~ Hora	-4.537	0	0.22505
Razão ~ Local + Hora	-2.974	1.563	0.10301
Razão ~ Local	-2.969	1.568	0.10275
Razão ~ Beaufort + Hora	-2.679	1.858	0.08888
Razão ~ Distância + Hora	-2.607	1.930	0.08574
Razão ~ Beaufort	-2.471	2.066	0.08010
Razão ~ Distância	-2.466	2.071	0.07990
Razão ~ Beaufort + Local + Hora	-1.003	3.534	0.03845
Razão ~ Distância + Local + Hora	-0.957	3.580	0.03757
Razão ~ Distância + Local	-0.874	3.663	0.03605
Razão ~ Beaufort + Local	-0.864	3.673	0.03587
Razão ~ Distância + Beaufort + Hora	-0.680	3.857	0.03271
Razão ~ Distância + Beaufort	-0.386	4.151	0.02824
Razão ~ Distância + Beaufort + Local + Hora	1.085	5.622	0.01353
Razão ~ Distância + Beaufort + Local	1.302	5.839	0.01214

Com relação às direções de voo dos indivíduos é possível notar que até 100m existe uma tendência de direção à floresta. A 150m, entretanto, a variância é grande, o que indica que os ângulos estão mais dispersos, ou seja, esses indivíduos não possuíam uma direção preferencial, resultando em voos aleatórios (Figura 11).

Os valores mais altos do nível de concentração (r) são para os tratamentos de 25m e 200m, mas as médias são 348.5° e 50° , respectivamente. Isso indica que para 25m as borboletas estavam, em sua maioria, realizando uma trajetória em direção à floresta. Entretanto, a média para 200m indica que as borboletas não estavam indo em direção à floresta. Os menores valores de “ r ” foram para 150m e 250m. O valor de Z (1.236) e o valor de p (0.291) para 250m indicam que o valor de “ r ” não é significativo estatisticamente. Portanto, além da média ser alta o valor do nível de concentração é pequeno e pouco significativo. Ou seja, a 250m as borboletas dificilmente tomavam direções para a floresta e os ângulos foram muito variados. Apesar de a média para 150m ser 25° , o pequeno valor do nível de concentração (cerca de metade do “ r ” a 100m) indica uma alta variância, ou seja, voos mais aleatórios. Dessa forma, é possível notar que a partir de 150m os indivíduos não possuíam preferência por uma direção e é justamente a essa distância que a taxa de retorno cai para metade (Figura 11).

Figura 11. Histogramas por distância com distribuição dos ângulos, resultados do teste de Rayleigh e valores das médias. N = quantidade de ângulos; r = nível de concentração (concentração máxima = 1); p = nível descritivo; Z = significância de r; Média = média dos ângulos medidos por grupo de distância.

Além do teste de Rayleigh foi realizado o teste-V, no qual se estabeleceu a média esperada como sendo 0° (direção para a floresta). É possível observar uma clara diminuição dos valores de V conforme a distância em relação à floresta aumenta (Tabela 6). O teste V corrobora o teste de Rayleigh, já que os valores de V caem consideravelmente a partir de 150m. Entretanto, o tratamento de 200m é uma exceção a essa tendência, possuindo o terceiro maior valor de V. Isso provavelmente ocorreu devido a uma diferença amostral. Enquanto todos os outros grupos tiveram no mínimo dez borboletas por tratamento, o grupo de 200m teve apenas sete, já que as outras três foram não sobreviventes.

Tabela 6. Valores observados para o teste V, com média esperada estabelecida em 0°. $p < 0,01$ para todas as distâncias, exceto 250m ($p = 0.356$).

Distâncias	25m	50m	75m	100m	150m	200m	250m
Teste V	0.537	0.381	0.235	0.261	0.155	0.313	0.031

4. DISCUSSÃO

Conforme aumenta a distância, diminui a quantidade de indivíduos que retornam à floresta. A taxa de retorno cai pela metade na distância de 150m. A análise de Cox corroborou que a distância influencia a taxa de retorno dos indivíduos em conjunto com a tortuosidade e o local de soltura. Entretanto, a distância não é o principal fator explicativo da variação na tortuosidade, mas também a hora do dia e o local de soltura. A análise dos ângulos entre pontos consecutivos em relação à floresta provou que a partir de 150m os ângulos ficam mais dispersos, ou seja, os voos se tornam aleatórios.

A distância em relação à floresta claramente afeta a taxa de retorno dos indivíduos e, consequentemente sua sobrevivência. Além disso, caminhos mais tortuosos aumentam o tempo do trajeto e reduzem a taxa de retorno. Entretanto, o local de soltura também se revelou um fator importante para o retorno dos indivíduos. Devido ao uso de diferentes locais com algumas características distintas, foi possível notar que pequenas diferenças na topografia e altura da vegetação são importantes para o retorno dos indivíduos. As borboletas apresentavam mais dificuldade de retornar quando translocadas para locais que possuíam pequenos morros, por exemplo. Também foi possível observar em campo que as borboletas possuíam mais dificuldade de retorno em locais onde o ponto de soltura ficava mais baixo que a floresta, devido ao relevo. Pe'er et al. (2004) acreditam que dicas visuais são fatores muito importantes para direcionar o movimento de borboletas e que, portanto, os padrões de dispersão quando na matriz são afetados por dois fatores principais: topografia e estrutura da vegetação. Portanto, essas diferenças entre os locais de soltura provavelmente afetaram a capacidade de percepção dos indivíduos e, consequentemente, influenciaram as taxas de retorno.

A percepção de fragmentos florestais deveria resultar em movimentos orientados, portanto trajetórias dentro da capacidade de percepção deveriam ser retilíneas e direcionadas ao fragmento florestal (PREVEDELLO; FORERO-MEDINA; VIEIRA, 2010). Entretanto, mesmo dentro da capacidade de percepção outros fatores podem afetar a tortuosidade dos caminhos (PREVEDELLO; FORERO-MEDINA; VIEIRA, 2010). Dessa forma, a distância em relação à floresta não foi um fator importante para explicar a tortuosidade dos trajetos. As melhores variáveis explicativas para a variação na tortuosidade das trajetórias foram a hora do dia em que foi realizada a soltura e o local de soltura.

A capacidade de percepção pode ser dependente do contexto, variando com a luminosidade e cobertura de nuvens (PREVEDELLO; FORERO-MEDINA; VIEIRA, 2011). Em geral, as solturas foram realizadas em dias quentes. Entretanto, foram realizadas em níveis de nebulosidade variáveis. Além disso, os indivíduos foram translocados em diferentes horários variando das 7h30 até 13h45. Durante o início da manhã, as borboletas costumam forragear procurando alimento, sendo mais ativas. Conforme a temperatura se eleva no final da manhã elas costumam voar menos, procurando locais com mais sombra. Foi possível observar que quando a temperatura está amena e a nebulosidade está alta, as borboletas não sentem tanto a necessidade de retornar prontamente para a floresta quanto sob temperaturas altas e pouca nebulosidade. Isso ocorre porque quando a temperatura está amena com alta nebulosidade as condições climáticas não são tão divergentes das de dentro da floresta. Dessa forma, no segundo cenário os indivíduos tendem a voar de forma mais retilínea do que no primeiro cenário, já que as borboletas desejam retornar de maneira mais ágil. Portanto, essas variações na nebulosidade, temperatura e comportamento durante as diferentes horas do dia afetam a capacidade de percepção e, consequentemente, a tortuosidade das trajetórias.

Muitas vezes o ponto de soltura dos indivíduos era logo antes de um morro. Como as borboletas eram translocadas em caixas, estas eram colocadas no solo e abertas para a soltura dos indivíduos. Dessa forma, muitas vezes as caixas ficavam abaixo de um morro, sendo que no nível da caixa não era possível ver a floresta, o que causava um bloqueio visual. Como as borboletas parecem perceber a paisagem por dicas visuais (PE'ER et al., 2004), devido às diferenças de topografia e altura da vegetação entre os locais de soltura, a capacidade de percepção de alguns indivíduos a uma mesma distância em relação à floresta foi diferente. Com a redução na capacidade de percepção, a tortuosidade de alguns trajetos foi maior e o contrário também ocorreu. Sendo assim, os locais de soltura em conjunto com a hora do dia influenciaram a tortuosidade dos caminhos, ou seja, os ângulos realizados pelas borboletas durante suas trajetórias.

A partir de 150m os ângulos das trajetórias se tornaram mais dispersos, o que indica que os voos começaram a se tornar aleatórios. O teste V corrobora essa observação, assim como a taxa de retorno, na qual a 150m apenas metade consegue retornar. Portanto, esses dados permitem concluir que a distância ideal para a espécie *H. erato* nessa paisagem é até 100m. Em seu estudo Prevedello, Forero-Medina e Vieira (2011) encontraram um padrão semelhante para marsupiais, no qual os indivíduos soltos mais próximos à floresta eram mais bem orientados. Para marsupiais, a altura e densidade da vegetação influenciam sua capacidade de percepção. Entretanto, para as borboletas, a topografia do local aparenta ser um dos principais fatores influenciando essa capacidade. Apesar dessa diferença, é possível inferir que a distância em relação à floresta é um fator em comum influenciando ambos os animais.

A conectividade funcional para uma espécie é determinada primariamente por como a capacidade de percepção dos indivíduos e sua interação com a estrutura da paisagem (SCHOOLEY; WIENS, 2003). Sendo assim, é possível inferir que a capacidade de percepção da espécie *H. erato* na paisagem estudada resulta em uma probabilidade de 60% de retorno até 100 metros, sendo que os indivíduos ainda conseguem perceber com facilidade e, conseqüentemente, se orientar em direção à floresta. Portanto, a conectividade funcional da paisagem para a espécie em estudo é alta até uma distância de 100 metros entre fragmentos, tornando-se reduzida a partir de 150m. Entretanto, conforme foi possível observar, a distância em relação à floresta é um fator importante para a taxa de retorno, mas as características específicas da matriz e a hora do dia são determinantes também.

As matrizes nem sempre possuem características hostis, podendo se comportar de maneira favorável como, por exemplo, atuar como habitat secundário (DENNIS; HARDY, 2007) ou ser uma estrutura de conexão entre fragmentos (STASEK; BEAN; CRIST, 2008). Entretanto, essas funcionalidades dependem do grau de similaridade entre as matrizes e os fragmentos. Sendo que quanto mais estruturalmente similares elas forem, maior é a qualidade da matriz (PREVEDELLO; VIEIRA, 2010). No caso em que a matriz possui a estrutura completamente distinta dos fragmentos de vegetação nativa –como nesse estudo– ainda é importante manter a conectividade funcional entre esses fragmentos. Para tal, descobrir a distância de percepção máxima é essencial. Com isso é possível obter a distância máxima permitida entre fragmentos para manter populações de certa espécie. Dessa forma, é importante manter uma distância de 100 metros entre fragmentos florestais circundados por matrizes estruturalmente distintas das manchas para garantir a conservação do gênero *Heliconius*.

5. CONCLUSÕES

A matriz considerada nesse estudo era de cana-de-açúcar recém colhida que não possui similaridade estrutural com a vegetação nativa da região. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (2015), a área cultivada de cana-de-açúcar que seria colhida e destinada à atividade sucroalcooeira na safra 2015/2016 foi de 4.678,7 mil hectares apenas no estado de São Paulo (principal produtor). Considerando a estrutura da cana-de-açúcar recém-colhida, ela se assemelha a outros monocultivos comuns como da soja, por exemplo.

De acordo com Amaral (2012), cultivos que se assemelhem à estrutura dos fragmentos nativos são mais ideais do que os que não se assemelham, porque são mais permeáveis ao movimento. Entretanto, é importante levar em consideração não apenas a estrutura, mas também a composição da matriz quando comparada ao habitat original. Estudos que comparem a permeabilidade de cultivos, com diferentes tipos de estrutura e composição, para determinadas espécies são importantes para definir o quão conectados funcionalmente estão os fragmentos nativos nas paisagens. Além disso, em muitos casos esses cultivos, ou essas matrizes, não serão estruturalmente similares, se tornando menos permeáveis. Esse é o caso de cultivos de cana-de-açúcar durante o período de colheita, soja, dentre outros. Para manter a conectividade funcional nesses casos é imprescindível estabelecer uma distância máxima entre fragmentos.

Além da importância intrínseca da conservação do gênero *Heliconius* por si só, é importante relembrar a importância das borboletas para os ecossistemas. Esses insetos são muito importantes para a reprodução de muitas plantas, além de serem a base de muitas cadeias tróficas. Dessa forma, para evitar a extinção de subpopulações do gênero *Heliconius* em paisagens agrícolas que incluem cultivos estruturalmente distintos dos fragmentos florestais é necessário manter uma distância de no máximo 100 metros entre os fragmentos.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, P. *Movimento de borboletas frugívoras e conectividade funcional em uma paisagem de Mata Atlântica*. 2012. 46f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.
- ANTONGIOVANNI, M.; METZGER, J.P. Influence of matrix habitats on the occurrence of insectivorous bird species in Amazonian forest fragments. **Biological Conservation**, v. 122, p. 441-451, 2005.
- AWADE, M.; METZGER, J.P. Using gap-crossing capacity to evaluate functional connectivity of two Atlantic rainforest birds and their response to fragmentation. **Austral Ecology**, v.33, n. 7, p. 863-871, 2008.
- AWADE, M.; BOSCOLO, D.; METZGER, J. P. Using binary and probabilistic habitat availability indices derived from graph theory to model bird occurrence in fragmented forests. **Landscape Ecology**, v. 27, n. 2, p. 185 – 198, 2012.
- BÉLISLE M. Measuring landscape connectivity: the challenge of behavioral landscape ecology. **Ecology**, v. 86, n. 8, p.1988-1995, 2005.
- BENDER D.J.; FAHRIG L. Matrix structure obscures the relationship between interpatch movement and patch size and isolation. **Ecology**, v.86, n.4, p.1023–1033, 2005.
- BERGEROT, B. et al. Coupling inter-patch movement models and landscape graph to assess functional connectivity. **Population Ecology**, v. 55, p. 193-203, 2013.
- BOSCOLO, D. et al. Importance of Interhabitat Gaps and Stepping-Stones for Lesser woodcreepers (*Xiphorhynchus fuscus*) in the Atlantic Forest, Brazil. **Biotropica**, São Paulo, v. 40, n. 3, p. 273 – 276, 2008.
- BROWN JR., K.S. Conservation of Neotropical environments: insects as indicators. In: COLLINS, N.M.; THOMAS, J.A. (Eds.) **The conservation of insects and their habitats**. London: Academic Press. Royal Entomological Society Symposium XV, 1991, p. 349-404.
- BROWN JR., K.S. Borboletas da Serra do Japí: diversidade, hábitos, recursos alimentares e variação temporal. In: MORELLATO, L.P.C. (Ed.) **História Natural da Serra do Japí: Ecologia e preservação de uma área florestal no sudeste do Brasil**. Campinas: Unicamp/Fapesp, 1992, p. 142-187.
- BROWN JR., K.S. Conservation of threatened species of Brazilian butterflies. In: AE, S.A., et al. (Eds.) **Decline and conservation of butterflies in Japan**. Yadoriga special issue. Osaka: Lepidopterist Society of Japan, 1996, p. 45-62.
- BROWN JR., K.S. Diversity, disturbance, and sustainable use of neotropical forests: insects as indicators for conservation monitoring. **Journal of Insect Conservation**, v. 1, n. 1, p. 25-42, 1997.
- CODLING, E.A.; PLANK, M.L.; BENHAMOU, S. Random walk models in biology. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 5, n. 25, p. 813-834, 2008.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília: Conab, 2015.
- COX, D.R. Regression models and life-tables. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 34, n. 2, p. 187–220, 1972.
- CROOKS, K. R.; SANJAYAN, M. Connectivity conservation: maintaining connections for nature. In: _____. **Connectivity conservation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006, p. 1–20.
- DANCOSE, K.; FORTIN, D.; GUO, X. Mechanisms of functional connectivity: the case of free-ranging bison in a forest landscape. **Ecological Applications**, v. 21, n. 5, p. 1871-1885, 2011.

- DENNIS, R.L.H., HARDY, P.B. Support for mending the matrix: resource seeking by butterflies in apparent no-resource zones. **Journal of Insect Conservation**, v.11, p. 157-168, 2007.
- ENDRINGER, F.B.; SILVA, P.R.; LUTZ, L.V. Hipóteses evolutivas sobre a origem e manutenção dos dormitórios comuns de *Heliconius erato* (Lepidoptera, Nymphalidae) **Natureza on line**, v. 2, n. 1, p. 1-9, 2004. Disponível em: <<http://www.naturezaonline.com.br/natureza/conteudo/default.asp?volume=2&numero=1>>. Acesso em: 16 dez. 2012.
- FABRITIUS, H.; RÖNKÄ, K.; OVASKAINEN, O. The dual role of rivers in facilitating or hindering movements of the false heath fritillary butterfly. **Movement Ecology**, v. 3, n. 4, p. 1-15, 2015. Disponível em: <<https://movementecologyjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40462-015-0031-z>>. Acesso em: 10 abr. 2016.
- FAHRIG, L.; MERRIAM, G. Conservation of fragmented populations. **Conservation Biology**, v.8, n.1, p. 50-59, 1994.
- FAHRIG, L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. **Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics**, v. 34, p. 487-515, 2003.
- FORERO-MEDINA, M.; VIEIRA, M.V. Perception of a fragmented landscape by neotropical marsupials: effects of body mass and environmental variables. **Journal of Tropical Ecology**, v. 25, n. 1, p. 53-62, 2009.
- GASCON, C. et al. Matrix habitat and species richness in tropical forest remnants. **Biological Conservation**, v. 91, n. 2-3, p. 223-229, 1999.
- HANSKI, I.; SAASTAMOINEN, M.; OVASKAINEN, O. Dispersal-related life-history trade-offs in a butterfly metapopulation. **Journal of Animal Ecology**, v. 75, p. 91-100, 2006.
- HANSKI, I. Eco-evolutionary spatial dynamics in the Glanville fritillary butterfly. **PNAS**, v. 108, n. 35, p. 14397 - 14404, 2011.
- HANSKI, I. Habitat fragmentation and species richness. **Journal of Biogeography**, v. 42, n. 5, p. 989-994, 2015. Correspondence.
- HAYNES K.J.; CRONIN J.T. Interpatch movement and edge effects: the role of behavioral responses to the landscape matrix. **Oikos**, v. 113, n. 1, p. 43-54, 2006.
- HOLZINGER, H.; HOLZINGER, R. **Heliconius and related genera**. France: Sciences Natural, 1994. 328 p.
- HUDGENS, B. R.; HADDAD, N. M. Predicting which species will benefit from corridors in fragmented landscapes from population growth models. **The American Naturalist**, v. 161, n. 5, p. 808-820, 2003.
- HURVICH, C.M.; TSAI, C.L. Regression and time series model selection in small samples. **Biometrika**, v.76, p. 297-307, 1989.
- KAREIVA, P.M.; SHIGESADA, N. Analyzing insect movement as a correlated random walk. **Oecologia**, v. 56, n. 2-3, p. 234-238, 1983.
- KÖPPEN, W. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la tierra. México: Fundo de Cultura Econômica, 1948, 474 p.
- LARSEN, K.W.; BOUTIN, S. Movements, survival and settlement of red squirrel (*Tamiasciurus hudsonicus*) offspring. **Ecology**, v. 75, n.1, p. 214-223, 1994.
- LIMA, S. L.; ZOLLNER, P. A. Towards a behavioral ecology of ecological landscapes. **Trends in Ecology and Evolution**, v.11, p.131-135, 1996.
- MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, pg. 853-858, 2000.

- NOWICKI, P. et al. Butterfly dispersal in inhospitable matrix: rare, risky, but long-distance. **Landscape Ecology**, v. 29, p. 401-412, 2014.
- OLIVEIRA, J.B. et al. O mapa pedológico do Estado de São Paulo. **O Agrônomo**, v. 52, n. 1, 2000.
- ÖCKINGER, E.; DYCK, H.V. Landscape structure shapes habitat finding ability in a butterfly. **PLoS ONE**, v. 7, n. 8, p. 1-6, 2012. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0041517>>. Acesso em: 10 abr. 2016.
- PATTERSON, T.A. et al. State–space models of individual animal movement. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 23, n. 2, p. 87 – 94, 2008.
- PE’ER, G. et al. Response to topography in a hilltopping butterfly and implications for modelling nonrandom dispersal. **Animal Behaviour**, v. 68, n. 4, p. 825-839, 2004.
- PE’ER, G. et al. Breaking functional connectivity into components: a novel approach using an individual based model, and first outcomes. **PLoS ONE**, v. 6, n. 8, p. 1-18, 2011. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0022355>>. Acesso em 10 abr. 2016.
- PÉRICO, E. Interação entre quatro espécies de Heliconiini (Lepidoptera: Nymphalidae) e suas plantas hospedeiras (Passifloraceae) em uma floresta secundária do Rio Grande do Sul, Brasil. **Biociências**, v.3, n.2, p. 3- 18, 1995.
- PETIT, S. et al. Metapopulation dynamics of the bog fritillary butterfly: movements between habitat patches, **Oikos**, v. 92, p. 491–500, 2001.
- POWNEY, G.D.; BROADERS, L.K.; OLIVER, T.H. Towards a measure of functional connectivity: local synchrony matches small scale movements in a woodland edge butterfly. **Landscape Ecology**, v. 27, p. 1109-1120, 2012.
- PREVEDELLO, J.A.; VIEIRA, M.V. Does the type of matrix matter? A quantitative review of the evidence. **Biodiversity and Conservation**, v. 19, n. 5, pg. 1205–1223, 2010.
- PREVEDELLO, J.A.; FORERO-MEDINA, G.; VIEIRA, M.V. Movement behaviour within and beyond perceptual ranges in three small mammals: effects of matrix type and body mass. **Journal of Animal Ecology**, v. 79, p. 1315 – 1323, 2010.
- PREVEDELLO, J.A.; FORERO-MEDINA, G.; VIEIRA, M.V. Does land use affect perceptual range? Evidence from two marsupials of the Atlantic Forest. **Journal of Zoology**, v.284, p.53–59, 2011.
- RIBEIRO, M. C. et al. Brazilian Atlantic forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009.
- SCHOOLEY, R.L.; WIENS, J.A. Finding habitat patches and directional connectivity. **Oikos**, v. 102, p. 559-570, 2003.
- SEVERNS, P.M.; MCINTIRE, E.J.B.; SCHULTZ, C.B. Evaluating functional connectivity with matrix behavior uncertainty for an endangered butterfly. **Landscape Ecology**, v. 28, p. 559-569, 2013.
- SILVA, M.R.B. **Efeitos de diferentes matrizes no risco de predação e na movimentação de uma ave florestal**. 2012. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- STASEK, D.J.; BEAN, C.; CRIST, T.O. Butterfly abundance and movements among prairie patches: the role of habitat quality, edge, and forest matrix permeability. **Environmental Entomology**, v. 37, n.4, p. 897-906, 2008.
- TAYLOR, P.D. et al. Connectivity is a vital element of landscape structure. **Oikos**, v. 68, n. 3, p. 571-573, 1993.
- TISCHENDORF, L.; FAHRIG, L. On the usage and measurement of landscape connectivity. **Oikos**, v. 90, n. 1, p. 7–19, 2000.

- UEHARA-PRADO, M. **Efeitos de fragmentação florestal na guilda de borboletas frugívoras do Planalto Atlântico Paulista**. 2003. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- UEZU, A.; BEYER, D.D.; METZGER, J.P. Can agroforest woodlots work as stepping stones for birds in the Atlantic forest region? **Biodiversity and Conservation**, v. 17, n. 8, p. 1907-1922, 2008.
- UMETSU, F.; METZGER, J.P.; PARDINI, R. Importance of estimating matrix quality for modeling species distribution in complex tropical landscapes: A test with Atlantic forest small mammals. **Ecography**, v. 31, p. 359–370, 2008.
- WILCOX, D.S.; MURPHY, D.D. Conservation strategy: The effects of fragmentation on extinction. *American Naturalist*, v. 125, n. 6, p. 879-887, 1985.
- WITH, K. A., GARDNER, R.H.; TURNER, M.G. Landscape connectivity and population distributions in heterogeneous environments. **Oikos**, v. 78, n. 1, p. 151–169, 1997.
- ZELLER, K.A.; MCGARIGAL, K.; WHITELEY, A.R. Estimating landscape resistance to movement: a review. **Landscape Ecology**, v. 27, n. 6, p. 777–797, 2012.
- ZOLLNER, P. A.; LIMA, S. L. Landscape-level perceptual abilities in white-footed mice: perceptual range and the detection of forested habitat. **Oikos**, v.80, p. 51-60, 1997.
- ZOLLNER, P. A.; LIMA, S. L. Illumination and the perception of remote habitat patches by white-footed mice. **Animal Behaviour**, v. 58, n. 3, p. 489–500, 1999.
- ZOLLNER, P.A.; LIMA, S.L. Behavioral trade-offs when dispersing across a patchy landscape. **Oikos**, v.108, p.219–230, 2005.